HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Advanced Systems for a Low Power Wide Area Wireless Network of IoT Devices [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	山口, 歌奈子
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14136号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78244
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kanako_Yamaguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　山口歌奈子

学 位 論 文 題 名

Study on Advanced Systems for a Low Power Wide Area Wireless Network of IoT Devices

（IoT システム向け長距離無線通信方式の高度化に関する検討）

近年, M2M (Machine to Machine) 通信や IoT (Internet of Things) システムの普及に伴い, 比較的少量のデータを間欠的かつ広範囲に通信する LPWA (Low Power Wide Area) ネットワークの需要が急速に高まり, ISM バンドを利用した LoRaWAN, Sigfox や, LTE 標準規格を利用した NB-IoT (Narrow Band-IoT), LTE-M 等のサービスが提供され始めている. 今後のさらなる IoT システムの発展を見据え, ITU-R (International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector) では将来の無線通信システムにおけるユースケースとその要求条件として, (1) 機器制御信号を伝送可能とする高信頼性, (2) 監視カメラ動画等を伝送可能とする大容量性, (3) 増加を続けるネットワーク接続端末を収容可能とする多数端末収容性, の 3 点を勧告した. 本勧告を鑑みると, 将来の IoT システム実現にはユースケースごとに適した無線通信システムの適用が求められるといえる. そこで, 本論文では将来の IoT システム実現に向け, “高信頼性”, “大容量性”, “多数端末収容性” の観点から長距離無線通信方式の高度化に関する検討を行う.

第 1 章では, 以上の背景と課題を述べるとともに, 3 つのユースケースそれぞれに対して, 本論文で提案するに至った高度化技術の概要や利点について簡単に述べている.

第 2 章では, “高信頼” な長距離通信の実現を目指し, 位相回転送信ダイバーシチ方式を適用した狭帯域パイロットレス同期検波 FSK (Frequency Shift Keying) 方式を提案する. 電力効率が良く長距離通信を実現する FSK 方式の通信品質をさらに向上させるためには, 簡易な構成でダイバーシチ利得を獲得可能な STBC (Space-Time Block Coding) 方式の適用が考えられる. しかし, STBC 符号化規則の影響により符号化後の信号における包絡線変動量が増大するため, 線型性の高い増幅器を利用する必要が生じ, 電力効率の低下が問題となる. そこで, FSK シンボルごとに位相回転処理を付加する位相回転送信ダイバーシチ方式を提案し, 包絡線変動量の抑圧を図る. また, 長距離通信を実現する同期検波方式では伝送路推定の適用が必須であり, その推定精度は通信品質に大きな影響を与える. しかし, 推定精度向上のために多数の既知 (パイロット) 信号を挿入した場合, 伝送効率が低下してしまう. これを回避するため, FSK 信号の初期位相が一意に決定される性質に着目し, この情報を用いて既知信号の挿入なしに高精度な推定を実現するパイロットレス同期検波 FSK システムを提案する. 計算機シミュレーションによる評価の結果, 位相回転送信ダイバーシチ方式の適用により従来方式と比較して包絡線変動量の増大を 10 dB 改善可能であることを明らかにした. また, 提案システムでは高速移動環境においても既知信号の挿入なしに高精度な推定を実現し, 良好な特性が得られることが示された.

第 3 章では, “大容量化” の実現に向けた検討を行う. 伝送容量の拡大には変調多値数の増加が

必要となるため, 所要 SN 比の増加に伴う伝送距離の低下が課題であった. これに対し, 本論文では周波数と空間の 2 次元でダイバーシチを実現することにより, 長距離性と高信頼性の同時実現を図る. はじめに, 電力正規化の適用により多値変調方式の適用を可能とする PN-DSTBC (Power Normalized-Differential STBC) 方式と, 多重された信号を異なる周波数で伝送することにより周波数ダイバーシチを実現する周波数符号化方式を連接する周波数・空間 2 次元ダイバーシチ方式を検討した. しかし, これらの方式を単に連接した場合は, 受信側において DSTBC 復号後の等価雑音分散の偏りが要因となり後段の周波数復号特性が劣化し, 伝送距離の低下を招くことがわかった. そこで, 本論文では等価雑音分散の偏りを一様とする補正係数を適用する補正型周波数・空間 2 次元ダイバーシチ方式を提案する. 計算機シミュレーションによる評価の結果, PN-DSTBC 方式と周波数符号化方式を単に連接した場合は変調多値数の増加に伴い特性改善効果が減少し, 64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式適用時には PN-DSTBC 方式単体よりも特性が劣化するのに対し, 提案の補正係数を導入することによりいずれの変調多値数においても特性を改善できることが明らかとなった.

第 4 章では, “多数端末収容” の一助となるマルチユーザ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムに関して検討を行う. マルチユーザ MIMO システムでは, ユーザ間干渉等による特性劣化に対し, 伝送路情報に基づいたプリコーディングにより干渉抑圧を実現するブロック対角化法の適用が有効である. しかし, 一般に無線通信システムは時変動環境であり, プリコーディング行列生成から実際に送信するまでの間に伝送路が変動すると, 干渉抑圧効果の低減を招く. これに対し, 過去情報から未来の時刻における伝送路情報を推定する伝送路予測を適用し, 特性改善を図る. 本論文では, 伝送路変動の相関情報を用いることにより高精度な推定を可能とする AR (Auto-Regressive) モデルに基づく推定手法と, 過去情報間を繋ぐ N 次多項式を用いることによりパラメータ推定を不要とするラグランジュ外挿手法を検討する. 屋内伝搬測定結果を用いた評価の結果, いずれの環境においても提案の伝送路推定手法を適用することにより特性改善が可能であることを明らかにした. また, 予測範囲を移動距離 0.1 波長以内とした場合はスループット特性の劣化を 1/5 以下に低減可能であることがわかった.

第 5 章では, これまでの各提案と特性評価結果をまとめ, 結論を述べている.

本論文では将来の IoT システムの実現に向け, “高信頼”, “大容量”, “多数端末収容” という 3 つのユースケースそれぞれに対して, 長距離無線通信方式の高度化に関する検討を行った. その結果, 高信頼化には位相回転送信ダイバーシチを適用した狭帯域パイロットレス同期検波 FSK 方式が, 大容量化には QAM 伝送を可能とする等価雑音分散補正型周波数・空間 2 次元ダイバーシチ方式が, そして, 多数端末収容のためのマルチユーザ MIMO システムには過去情報から未来の時刻における伝送路情報を推定する伝送路予測手法の適用が有効であることを明らかにした. 本論文では扱えなかったマルチパス伝搬路モデルを用いた解析や, 実伝搬環境での検証が達成できれば, 将来の実用化が大いに期待される.